第 37 卷第 12 期 2017 年 6 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.12 Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201602240320
张妍,郑宏媚,陆韩静.城市生态网络分析研究进展.生态学报,2017,37(12):4258-4267.
Zhang Y, Zheng H M, Lu H J.A review of ecological network analysis in urban ecosystems.Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):4258-4267.

城市生态网络分析研究进展

张 妍*,郑宏媚,陆韩静
北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875

摘要:自生态网络分析方法提出 40 多年来,其理论发展和应用实践不断拓展,但直至 21 世纪才不断引入到城市生态系统研究中,用以分析城市内部多个主体和多种生态流构成的关联网络。目前,城市生态网络分析集中于生态网络分析方法与指标的拓展及多尺度的应用研究,而生态网络分析方法又形成了上升性分析和环境元分析两大分支,多尺度应用涵盖了城市镶嵌的区域背景尺度和城市内部产业部门之间的细节尺度。然而,当前研究仍存在着多尺度融合、多种生态网络分析方法集成不足等问题,这限制了城市生态网络分析方法在城市规划设计中的应用。未来城市生态网络分析研究集中于如下 3 点:(1)开展多尺度城市生态网络分析,包括城市群-城市-园区/社区等,构建多级嵌套生态网络模型;(2)集成上升性与环境元分析方法,提出由外在表征到内在过程的城市生态系统评价模式及模拟方法;(3)强调自然节点在城市生态网络中的重要作用,形成社会经济节点与自然节点并重的生态网络模型,并强调构建多精度的生态网络模型服务于不同的研究目的。

关键词:生态网络分析;多尺度;城市;上升性分析;环境元分析

A review of ecological network analysis in urban ecosystems

ZHANG Yan*, ZHENG Hongmei, LU Hanjing
State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, *China*

Abstract: It has been more than forty years since the ecological network analysis was proposed, and its theories and applications have developed rapidly. Until 2002, the method had only been used to study urban ecosystems and to analyze interconnected networks, including multiple actors and ecological flows. Presently, the application of ecological network analysis to urban ecosystems includes its use at multi-scales and based on different indicators. It has been subdivided into Network Environ Analysis and Ascendency Analysis; and the multi-scales indicate regions comprised by cities and cities including industrial sectors. However, there are still aspects of the method that need to be improved, such as the application of multi-scales (e.g., using cities as nodes in a network or specifying sectors in urban systems) or the combined analysis of different indicators, and these limitations restrict the use of the method for urban planning and design. To continue the development of ecological network analysis in urban ecosystems, three main perspectives should be addressed: (1) the application of ecological network analysis at multi-scales, such as urban agglomerations and systems and industrial parks and communities, and the development of nested ecological networks; (2) the combination of Ascendency and Network Environ Analyses to develop an assessment system or method from external and internal attributes; and (3) emphasis on the importance of natural actors in urban ecosystems, along with merging socio-economic and natural actors to establish ecological networks with different precision.

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0503005);新世纪优秀人才支持计划"生态模拟"(NCET-12-0059);国家自然科学基金创新研究群体项目(51421065);国家自然科学基金面上项目 (41571521);中央高校基本科研业务费专项资金(2015KJJCA09);中美国际(地区)合作交流项目(51661125010)
收稿日期:2016-02-24; **修订日期:**2016-12-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangyanyxy@ 126.com

Key Words: ecological network analysis; multi-scale analysis; urban system; ascendency; network environ analysis

城市作为人类活动高度集中的区域,在快速发展过程中面临着严重的生态环境问题,如资源耗竭、大气污染、垃圾肆虐、生态破坏等[1-2]。为应对城市发展面临的资源环境问题,我国著名生态学家马世骏先生提出了社会-经济-自然复合生态系统的概念[3-4],倡导运用生态学原理与方法来解析和重构城市生态系统。城市是一个有着组成结构与功能关系的有机组织,城市中组分间的物质能量交换往往涉及到多个主体、多种生态流,这些主体与生态流相互交织关联在一起,形成了网络结构形态,由此,可以将城市生态系统组分及相互作用关系抽象为网络,引入生态网络分析方法研究城市生态系统的研究[5-6]。

1973 年 Hannon[7]首次将投入产出分析方法引入到自然生态系统,分析了物质与能量流动,标志着生态网络分析思想的形成[8]。之后,1976 年 Finn[9]改进了 Hannon 的方法,提出了一系列量化生态系统结构的指标及指数,包括系统流通量、平均路径长度和循环指数等,这极大地促进了生态网络分析方法的形成。在此基础上,1976 年 Patten 等[10]正式提出了生态网络分析方法,并指出该方法是识别系统中物质和能量流动相关信息的手段[11],可以定量研究网络内部参与成员之间的相互作用关系[11-14],来理解生态系统的整体性和复杂性[15]。到了 20 世纪 70 年代末,已形成了生态网络分析的两大分支,环境元分析[11,16-17]和上升性分析[8,18],分别从网络整体状况及网络内部节点间互动作用两个方面开展研究。其中上升性分析是基于信息理论来分析网络内部物质与能量流动的整体表现[19],而环境元分析则深入至网络内部的参与者,分析基于生态网络流图的成员间流量分布,进而分析网络内部复杂的结构分布及功能关系[11,20]。一些学者也结合上升性分析和环境元分析优势,开展了由外在表征到内在过程的研究[21-23]。这些都为生态网络分析方法的应用提供了基础。目前已开发出多种软件,如 Matlab[24]、NetMatCalc[25]、NETWRK[26]、WAND[27]、EcoPath[28]等,可有效提升生态网络分析方法的可见性和应用效率。

目前,关于生态网络分析方法的研究已有综述,但大多偏重于方法的发展历程,1993 年韩博平[19]概述了“生态网络”概念的发展历程,同时针对环境元分析和上升性分析,分别介绍了网络循环指数的改进过程,以及网络稳定性和营养级结构分析等方面的研究现状。1999 年 Fath and Patten[11]对“生态网络分析”的发展进行了更为详细的综述,界定了网络环境的定义,以及网络的行为、结构和功能等特征;接着针对环境元分析,结合自然生态系统的案例,详述了存量分析、流量分析、效用分析等具体方法,并指出了环境元分析应用的假设和局限性。2011 年李中才等[8]人从网络整体表现到网络内部节点之间关系,详细解释了网络稳定性、上升性、邻接特征、效用分析和随机性指标,同时以自然生态系统为案例,指出网络间接流量的贡献。但是以上这些综述都强调生态网络方法的发展,并没有从生态网络方法多尺度的应用、相关指标的城市生态系统特征的描述及未来生态网络的应用前景等方面进行梳理与总结。本研究试图通过综述生态网络分析方法在城市系统中的应用,从而识别城市生态网络分析的优势及不足,为该方法在城市生态系统中的广泛应用提供指引,推动城市生态学学科的发展。

1　上升性分析

上升性理论起初被用于量化生态系统的发展程度、识别干扰对系统的影响,同时也用来对比不同生态系统之间的发展状态[29]。Ulanowicz[18,30]指出当一个系统不断发展时,它的上升性和相应的可持续性特征都随之增加。这一理论包含众多指标可以对系统的总体发展状况和系统总通量、资源在系统传递的平均路径长度等开展研究,具体指标见表 1[5,21-22,31-39]。

基于上升性理论在评价系统整体特征方面的优越性,Bodini and Bondavalli[5]计算资源交换的平均路径长度,并评价系统在水资源利用过程中的可持续性状态。Li 等[33]在此基础上选取上升性、发展能力和系统总开销评价黄河流域系统整体的发展。接着在 2010 年,Li 和 Yang[40]选取同样的指标评价了北京市城市水资源利用系统。与此同时,为了定量化人为干扰对系统的影响,Fiscus[41]对比分析了自然生态系统氮循环网络和

受到人类行为干扰后美国牛肉供应链氮循环网络,指出两种网络的连接度、营养级结构、营养级效率指标的差异性。接着,Bodini[37]在 Li 等[33]的基础上增加了系统总通量和平均交互信息指标,分析了美国 Sarmato 城市的水资源利用过程。Bodini 等[42]同样运用上述指标开展研究,但是对比分析了 3 个城市系统内部产业部门之间的水交换网络,评价了意大利 Emilia Romagna 区域典型城市居住区的持续发展状态。另外,也有学者从系统的抵抗力和系统效率入手,评价了城市的可持续性[43-44,38],而刘耕源等[23]则从系统通量、结构耦合程度等指标评价了大连市生态系统健康发展水平。Lu 等[31]强调了网络稳定性指标,结合网络上升性、平均交互信息等指标,评价了中国原油供应安全,而 Fang 和 Chen[21]在此基础上,增加了网络冗余度指标,评价了黑河流域水资源利用过程。另外也有学者通过强调营养级结构指标的重要性,评价了北京经济技术开发区或典型社区[22,45]的碳代谢过程。上升性分析是一种研究系统外在表征的有效手段,但是这些指标不能针对网络节点展开分析,而环境元分析是有效的解决这一问题的方法与手段。

表 1 上升性分析指标

Table 1 The indicators from ascendency analysis

指标 Indicator	内涵 Definition	公式 Equation	应用尺度 Application	参考文献 References
平均交互信息 Average mutual information	网络中物质或能量量子的平均相互限制程度,量化系统的发展	$AMI = k\sum_{i=1}^{n+2}\sum_{j=0}^{n}(\frac{f_{ij}}{T})\log_2(\frac{f_{ij}T}{T_iT_j})$	自然水系统;城市系统	[31-32]
系统总开销 Overhead	信息通过冗余性的连接在系统中的分布	$\varphi = \sum_{ij} f_{ij}\log_2\left[\frac{f_{ij}^2}{T_iT_j}\right]$	自然水系统;城市水系统	[33-34]
系统稳定性 Stability	系统抵抗外界干扰变化的能力	$H_R = -\sum_{j=0}^{n}(\frac{T_j}{T})\log_2(\frac{T_j}{T})$ $S = H_R - AMI$	国家尺度	[31]
上升性 Ascendency	定量化系统的规模和反馈	$A = \sum_{i=1}^{n+2}\sum_{j=0}^{n} f_{ij}\log_2(\frac{f_{ij}T}{T_iT_j})$	自然水系统;城市水系统	[33-34]
系统总通量 Total system throughput	系统中流经所有成员的流量的总和	$TST = \sum_{i=1}^{n+2}\sum_{j=1}^{n+2} f_{ij}$	自然生态系统;城市水系统	[35-36]
平均路径长度 Average path length	资源从任一成员进入系统到离开系统所要经过的平均路径数量	$APL = (TST - Z)/Z$	自然生态系统;城市水系统	[5,36]
系统发展程度 Development capacity	系统发展的最大潜力	$C = -\sum_{ij} f_{ij}\log_2\left[\frac{f_{ij}}{T_{ij}}\right]$	自然水系统;城市水系统	[34,37]
系统冗余度 Redundancy	衡量系统中信息的缺失	$R = -\sum_{ij=1}^{n} f_{ij}\log_2\left[\frac{f_{ij}^2}{T_iT_j}\right]$	自然水系统;城市水系统	[21,38]
营养级 Trophic level	模拟自然生态系统的食物链或食物网	$L_a = 1 + \sum(P_b \times L_b)$	自然生态系统;城市系统	[22,39]

2 环境元分析

环境元分析主要基于传统的 Leontief 投入产出分析,但 Suh[46]指出这种环境元分析与投入产出分析又有所不同,环境元分析类似于结构路径分析(SPA),而且框架趋于融合 Ghoshian 框架,而不是 Leontief 框

架[46-48]。该方法应用的前提是系统呈现稳态,也就是系统内每一个参与者其输入和输出的资源量都是相等的[11],在此基础上开展对网络内在结构分布和功能关系的研究[49-56](表 2)。

表 2　环境元分析指标

Table 2　The indicators from network environ analysis

指标 Indicator	内涵 Definition	公式 Equation	应用尺度 Application	参考文献 References
通量 Throughflow	每一个成员流通量的总和	$T_i = \left(\sum_{j=1}^{n} f_{ij}\right) + z_i$	自然生态系统;城市系统	[49-50]
综合流量 Integral flow	资源在成员之间流动的数量	$\mathbf{N} = (\mathbf{I}-\mathbf{G})^{-1}$	自然生态系统;城市系统	[49-50]
综合效用 Integral utility	定量化评价两两成员之间的生态关系	$\mathbf{U} = (\mathbf{I}-\mathbf{D})^{-1}$	自然生态系统;城市系统	[51-52]
控制程度 Control	识别某一节点对其他节点的控制作用	$\mathbf{CX} = (cx_{ij}) = (n_{ij}/n'_{ji})$	自然生态系统;城市系统	[53-54]
共生程度 Synergism	系统整体或每一个成员的效用水平	$\mathbf{S} = \mathrm{diag}(\mathbf{T})\,\mathbf{U}$	自然生态系统;城市系统	[55-56]

环境元分析在城市系统的应用较多集中在多种物质[57]、能源[49,58]、碳元素的研究[49-58],另外也包含对水[59]、硫[60]、氮[61]等要素分析,主要采用流量分析、效用分析和控制分析等方法。流量分析集中于对网络内节点间综合流量的计算,分析成员对网络的贡献[31,49,58]、对比分析了直接与间接流量[53,59-61]、明确了网络中节点的生态角色[62-65]、模拟网络生态层阶结构[2,6,66-67]。效用分析方法集中于节点间生态关系的研究,确定了生态关系的占比结构[2]、分析了生态关系的稳定性[68],对比了直接与综合生态关系变化[6,53,64-65,69]及不同精度网络模型的生态关系变化[35,70]、识别了上下游分布[63,71]、估算了系统节点的净效益[1,55,62]及间接效益的比重[52]、评价了网络整体共生水平[21,57,72]。控制分析方法集中节点对网络影响的识别,包括直接和综合控制强度的对比[57]、节点依赖程度和控制程度的对比[53,65,72]。

3　多尺度应用

2002 年 Bodini and Bondavalli[5]首次将生态网络分析方法引入到城市系统,自此,生态网络分析方法的应用范围不断拓展,包括将城市作为一个节点,分析其镶嵌的城市群、流域、国家、全球生态网络中物质与能量流动,为城市系统研究提供了不同尺度的背景场;也有深入到城市节点的内部,分析城市内部多节点构成的生态网络或典型社区/园区中物质与能量的流动,为识别城市内部的差异性提供了详细的决策数据(图 1)。

城市背景尺度研究多集中于水[33]、能源[62]等关键要素,较少关注多种物质的综合代谢过程[73](图 2),跨越全球、国家、流域和城市群等多个尺度。水要素的研究大多集中于流域尺度,如 2009 年 Li 等[33]采用生态网络分析方法研究水资源利用系统,分析了 1998—2006 年黄河流域水提供、水生产、水消费等子系统 13 个节点间的水流动过程,并提出相应的网络评价指标。在此基础上,有学者基于物质能量流动过程构建了虚拟水生态网络模型,模拟了生产与消费部门之间商品传递过程中所负载的全部水资源,如白洋淀流域[34]、黑河流域[21]等,另外也有学者以灰水足迹量作为路径流量构建了 2006—2013 年滇池流域水代谢网络模型[74]。2012 年 Yang 等[57]将虚拟水模型应用到全球尺度,分析了 1995—1999 年世界范围 13 个区域之间农业和畜禽养殖业生产过程的虚拟水流动过程。在国家、城市群尺度上也开展了能源要素的研究,如 Lu 等[31]以中国原油生产与消费部门、外部供应为节点,分析了 2001—2010 年中国原油供应安全;而 Zhang 等[62]以中国 7 大区 30 个省区为节点,基于地区间投入产出表构建了隐含能生态网络模型。之后,有学者将隐含能生态网络模型应用到城市群尺度的研究中,分析了京津冀城市群能源代谢过程,构建了 3 地多个产业部门之间的生态网络模型[63],并将能源代谢与碳足迹相结合,分析了能源与碳两个生态网络特征的差异[75]。除了关注于关键的生态要素外,有学者采用物质流分析方法,在核算多种物质与能量的基础上,剖析了中国社会代谢过程,构建了

包括环境节点的生态网络模型[1,73]。

全球、国家、
城市群、流域尺度
城市1
城市2
城市3
城市4
城市5
城市6
外部环境
城市尺度
农业
交通业
工业
建筑业
服务业
本地消费
外部环境
园区尺度
管委会信息中心
废物处理与循环利用
一般基础设施
环保基础设施
企业1
企业2
外部环境
社区尺度
居民小区1
能源水供给
服务设施
废物收集与预处理
居民小区2
生态景观
外部环境

图 1 城市生态网络分析的多尺度应用

Fig.1 The multi-scale analysis of ecological network analysis in urban ecosystems

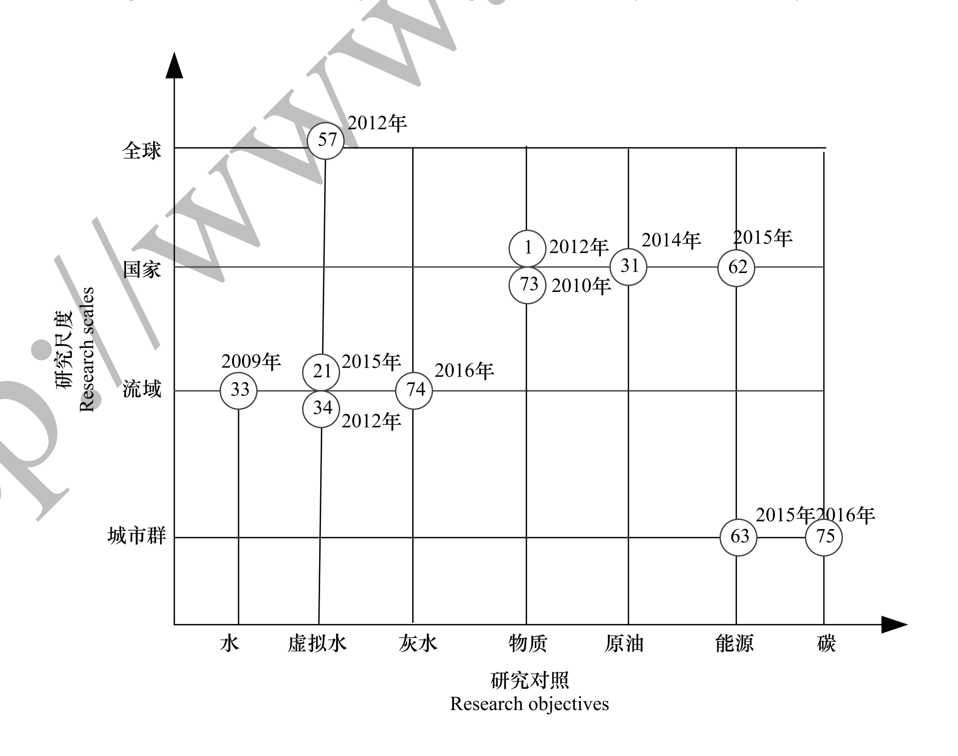


图 2 城市背景尺度文献汇总

Fig.2 The references in the scale of treating city as one node in a network

圆圈中数字代表文中参考文献编号

城市细节尺度主要以代谢的视角开展研究,构建了城市范围内的代谢生态网络模型,以及社区/园区代谢生态网络模型(图 3)。Borrett[76]指出可以研究自然生态系统成员之间相互作用关系及流通量分布的分析方法拓展到产业生态学领域,引入概念"代谢"概念开展产业或城市系统资源流动过程研究[77]。

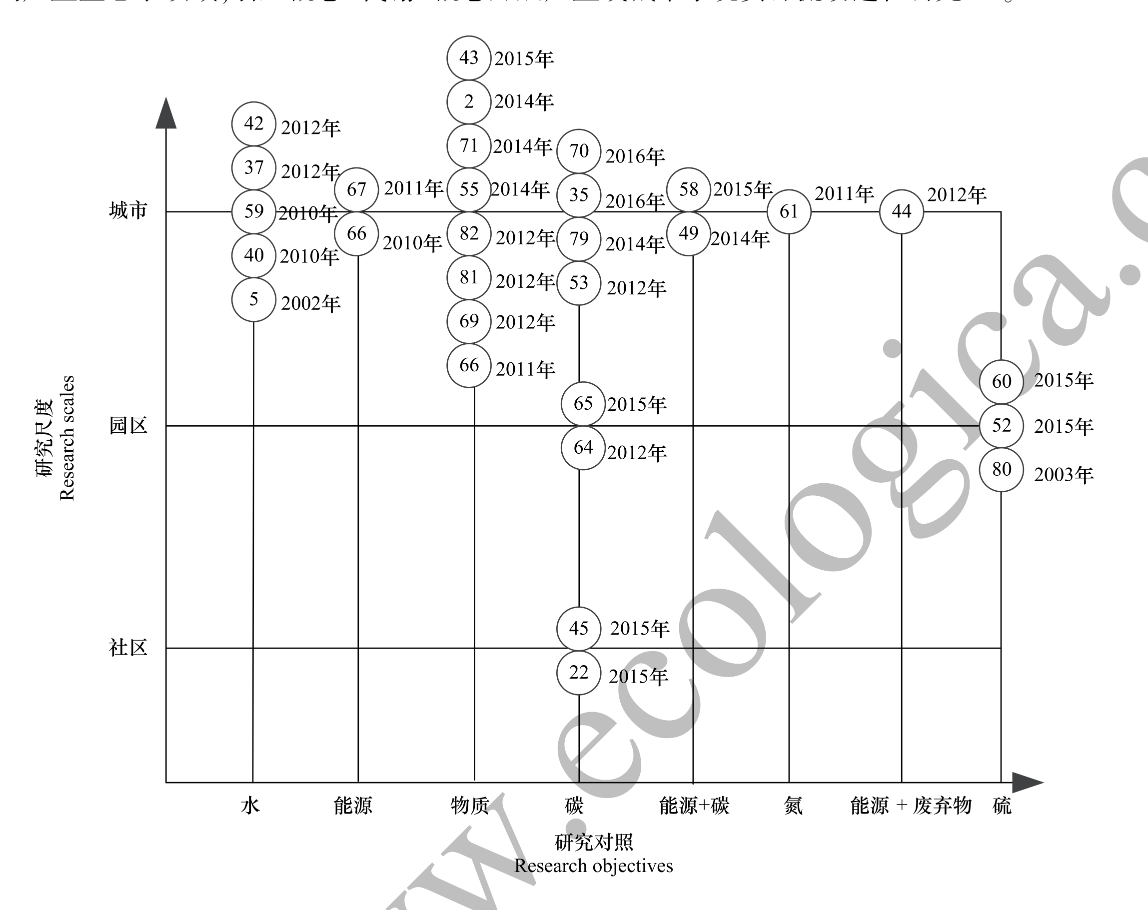


图 3　城市细节尺度文献汇总

Fig.3　The references in the scale of specifying sectors in an urban system

在 Ecological Indicators 专刊的一篇导语中也指出生态网络分析是一种研究城市代谢的有效方法,它将传统的黑箱模式拓展到研究内部社会经济部门和外界环境之间的相互作用关系[78]。要素分析方面集中于生态网络分析方法与物质流、能量流方法的结合,对多种物质统一核算后构建生态网络模型,当然还涉及到碳[79]、水[59]、能源[66]、硫[80]、氮[61]等关键要素的研究。基于物质能量转换过程,一些学者通过结合能值[69]和火用[81]、物质流分析[55,71]等核算方法构建了生态网络模型,模拟了系统的结构分布和功能关系。还有的学者将投入产出分析与物质流分析[2,82]、㶲[43]、能值[6]相结合,精细化了代谢生态网络模型。城市碳代谢研究成果突出体现在时空尺度生态网络模型的构建,包括考虑城市内外环境和产业部门[53]的模型,或仅考虑社会经济产业部门[49,58]的模型,或以土地利用转换为基础构建空间生态网络模型[35,70];能源要素研究中所构建的生态网络模型有两类,一是实物能流网络,二是隐含能源流动网络[49,58]。实物能源网络包括考虑实物型网络流量的能源产业生态网络模型[44]、能源代谢网络模型[66]等,以及、不同精细度城市能源代谢生态网络模型的对比研究[67]。水要素研究中所构建的生态网络模型不同之处在于对自然组分考量程度的差异。Bodini 及其团队构建的网路模型中充分考虑了自然生态系统的影响,并将水源、泉水或溪流等与社会经济系统中的产业部门共同看作网络中的节点[5,37],开展了多个城市水系统的对比分析[42]。Li 和 Yang[40]在此基础上,增加了对外部环境和景观节点的考虑。而 Zhang 等[59]则从水代谢的角度入手,构建了包含外部环境和产业部门的城市水代谢网络模型。城市氮循环生态网络模型研究相对较少,仅 Min 等[61]对比了 5 个城市与 22 个自然生态系统的特征差异。在园区尺度,多集中于碳、硫等元素的研究,如硫网络结构特征分析[80]、硫代谢网络直接与间

接流量特征[60]、硫代谢网络生态关系分布[52],以及碳代谢网络生态关系分析[64-65]。社区层面集中于碳代谢过程研究,通过构建与家庭部门相关的网络模型,开展社区碳代谢网络状态分析[22,45]。

4 国内发展现状

国内生态网络分析的发展体现在两个阶段,一是20世纪90年代方法探讨及自然生态系统应用的研究阶段,二是21世纪初城市生态系统应用的研究阶段。1993年韩博平首次发表了有关生态网络分析方法的文章[19,83],之后其研究成果大多集中于某一类具体方法的分析与应用。韩博平1993年指出生态网络是对生态系统中物质、能量流动结构的模拟,并界定了生态网络的基本组成:节点和路径[83]。之后,韩博平在1995年也指出生态网络分析是一种研究生态系统整体行为和特征的方法,可以量化网络节点之间的相互作用过程和强度、揭示生态系统整体性和复杂性及其形成机制[15]。在环境元分析方面,有成果利用再循环指数开展了热带森林生态系统镁流动过程研究[84],及中国黄淮海平原农林与系统沙兰场-小麦-玉米群落的氮、磷、钾元素的循环效率研究[86];有成果采用路径分析探究了英吉利海峡生态系统中能量流动网络的营养结构信息[85];有成果采用系统通量指标分析了德国西部城市诺伊斯河口氮循环流动通量。在上升性分析方面,有成果基于发展程度、冗余度和上升性指数研究了海洋生物间能量流动网络[87]、水生生态系统中磷流动网络[87]、东巴拿马热带森林生态系统中镁流动网络[88]的稳定程度。

国内最早将生态网络分析方法引入城市生态系统研究的文献,始于2009年。张妍和杨志峰首次提出生态网络分析方法是研究城市生态系统互动关系的有效手段,并采用环境元分析中的效用分析方法,选取中国6大典型城市分析了社会经济子系统和自然生态子系统之间相互作用关系[89]。在此基础上,有学者将城市生态网络划分为不同的部门,分析了大连市社会经济关联的产业部门之间[23]以及淮河流域水资源供需部门之间的相互作用关系[90-91]。刘耕源等[23]基于生态热力学可用能核算,采用环境元方法分析了节点间通量及效用、路径长度及数量,评价了节点间可用能转换效率,从而剖析了节点之间的作用方式、生态关系及共生状况。张博在构建淮河流域水资源供需网络模型的基础上,突出了与城市系统相关的工业、农业、生活、水处理、水分配等环节之间的水流路径,并采用上升性分析中的平均交互信息指标评价了系统可持续性,及网络恢复力、效率和平衡能力等方面特征。之后,卢小丽和秦晓楠[92]以物质能量流动上负载的信息传递为路径,构建了包括驱动力、压力、状态、响应、影响等5个节点的网络模型,并采用上升性分析中的发展程度、冗余度和上升性指数分析了中国沿海城市生态系统的稳定程度和抗干扰能力。

5 未来发展方向

从多尺度应用来看,城市问题的解决需要将城市放到其镶嵌的大区域(全球、国家、流域、城市群)中来分析,检测物质与能量流动过程,然而现有城市背景尺度的研究还相对较少,特别是在城市群尺度上研究则更小。在中国大力推动城市群建设的大背景下,构建城市群生态网络模型,分析多个城市协同与错位发展将是未来的研究热点。同时,现有城市生态网络研究大多基于粗糙的或高聚合的数据,构建的网络模型还不能体现与具体地点、活动的关联,未来研究将集中于城市生态空间网络模型的构建,识别不同功能群的空间分布及相互物质、能量传递关系。无论将城市作为网络中的一个节点,还是将城市作为子网络,进而将其映射到空间上,需要构建多级嵌套的生态网络模型,由上至下及由下至上多途径、多层次追踪生态网络节点及路径,为理解城市可持续发展提供方法与手段。

从生态网络分析应用来看,上升性分析或环境元分析的应用不断发展,分别体现在外在特征评价及内在机理剖析两方面的贡献,但现有研究对两者的结合并不多。对一个城市生态网络的认识,需要从外在表征与内在过程两个方面来分析,这样才能更为全面的理解研究对象,力争服务于不同的研究需要,如城市状况的评价离不开上升性分析,而导致城市状况的原因剖析离不开环境元分析。

从城市生态网络模型构建来看,当前分析网络模型精度对研究结果影响的成果并不多见,未来需要深入

讨论与分析构建何种精度的生态网络模型可以服务于何种研究目标。而且,大多强调社会经济系统的贡献,对自然生态系统的网络参与有所忽略。大多将环境作为一个节点,或少数几个节点,并没有充分突出自然节点在城市生态网络中的贡献。城市生态网络不仅强调社会活动改变的城市自然,以及自然对社会的资源供给与废物接纳作用,更要求改变社会活动,使其成为生态系统的组成与分室,遵循生态学运行规律来发展。因此,社会经济节点与自然节点的参与整合研究同样重要。

参考文献(References):

[1] Zhang Y, Liu H, Li Y T, Yang Z F, Li S S, Yang N J. Ecological network analysis of China's societal metabolism. Journal of Environmental Management, 2012, 93(1): 254-263.

[2] Zhang Y, Zheng H M, Fath B D, Liu H, Yang Z F, Liu G Y, Su M R. Ecological network analysis of an urban metabolic system based on input-output tables: Model development and case study for Beijing. Science of the Total Environment, 2014, 468-469: 642-653.

[3] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9.

[4] 王如松. 生态文明建设的控制论机理、认识误区与融贯路径. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 173-181.

[5] Bodini A, Bondavalli C. Towards a sustainable use of water resources: A whole-ecosystem approach using network analysis. International Journal of Environment and Pollution, 2002, 18(5): 463-485.

[6] Zhang Y, Yang Z F, Yu X Y. Ecological network and emergy analysis of urban metabolic systems: Model development, and a case study of four Chinese cities. Ecological Modelling, 2009, 220(11): 1431-1442.

[7] Hannon B. The structure of ecosystems. Journal of Theoretical Biology, 1973, 41(3): 535-546.

[8] 李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 张漪. 生态网络分析方法研究综述. 生态学报, 2011, 31(18): 5396-5405.

[9] Finn J T. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows. Journal of Theoretical Biology, 1976, 56(2): 363-380.

[10] Patten B C, Bosserman R W, Finn J T, Cale W G. Propagation of cause in ecosystems // Patten B C, ed. Systems Analysis and Simulation in Ecology. New York: Academic Press, 1976.

[11] Fath B D, Patten B C. Review of the foundations of network environ analysis. Ecosystems, 1999, 2(2): 167-179.

[12] Szyrmer J, Ulanowicz R E. Total flows in ecosystems. Ecological Modelling, 1987, 35(1/2): 123-136.

[13] Fath B D, Killian M C. The relevance of ecological pyramids in community assemblages. Ecological Modelling, 2007, 208(2/4): 286-294.

[14] Patten B C. Environs: Relativistic elementary particles for ecology. American Naturalist, 1982, 119(2): 179-219.

[15] 韩博平. 关于生态网络分析理论的哲学思考. 自然辩证法研究, 1995, 11(7): 42-45.

[16] Patten B C. Systems approach to the concept of environment. The Ohio Journal of Science, 1978, 78(4): 206-222.

[17] 毛旭锋, 崔丽娟, 王昌海. 基于网络分析的湿地水文关系研究——以美国奥克弗诺基流域为例. 湿地科学, 2012, 10(3): 263-270.

[18] Ulanowicz R E. Growth and Development: Ecosystems Phenomenology. New York: Springer, 1986.

[19] 韩博平. 生态网络分析的研究进展. 生态学杂志, 1993, 12(6): 41-45.

[20] Levine S. Several measures of trophic structure applicable to complex food webs. Journal of Theoretical Biology, 1980, 83(2): 195-207.

[21] Fang D L, Chen B. Ecological network analysis for a virtual water network. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11): 6722-6730.

[22] Lu Y, Chen B, Hayat T, Alsaedi A. Communal carbon metabolism: Methodology and case study. Journal of Cleaner Production, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.137.

[23] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 徐琳瑜, 张妍. 基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例. 生态学报, 2013, 33(18): 5926-5934.

[24] Fath B D, Borrett S R. A Matlab© function for network environ analysis. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(3): 375-405.

[25] Latham L G. Network flow analysis algorithms. Ecological Modelling, 2006, 192(3/4): 586-600.

[26] Ulanowicz R E, Kay J J. A package for the analysis of ecosystem flow networks. Environmental Software, 1991, 6(3): 131-142.

[27] Fath B D. Network analysis in perspective: Comments on "WAND: An ecological network analysis user-friendly tool". Environmental Modelling & Software, 2004, 19(4): 341-343.

[28] Christensen V, Pauly D. ECOPATH II-A software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics. Ecological Modelling, 1992, 61(3/4): 169-185.

[29] Ulanowicz R E, Wulff F. Comparing ecosystem structures: The Chesapeake Bay and the Baltic Sea // Cole J, Lovett G, Findlay S, eds. Comparative Analyses of Ecosystems. New York: Springer, 1991: 140-166.

[30] Ulanowicz R E. Ecology, the Ascendent Perspective. New York: Columbia University Press, 1997.

[31] Lu W W, Su M R, Zhang Y, Yang Z F, Chen B, Liu G Y. Assessment of energy security in China based on ecological network analysis: A perspective from the security of crude oil supply. Energy Policy, 2014, 74: 406-413.

[32] Baird D, Asmus H, Asmus R. Nutrient dynamics in the Sylt-Rømø Bight ecosystem, German Wadden Sea: An ecological network analysis approach. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 80(3): 339-356.

[33] Li Y, Chen B, Yang Z F. Ecological network analysis for water use systems-a case study of the Yellow River Basin. Ecological Modelling, 2009,

220(22): 3163-3173.

[34] Mao X F, Yang Z F, Chen B, Chen H. Examination of wetlands system using ecological network analysis: A case study of Baiyangdian Basin, China. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 427-439.

[35] Xia L L, Fath B D, Scharler U M, Zhang Y. Spatial variation in the ecological relationships among the components of Beijing's carbon metabolic system. Science of the Total Environment, 2016, 544: 103-113.

[36] Baird D, Asmus H, Asmus R. Carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in nine sub-systems of the Sylt-Rømø Bight ecosystem, German Wadden Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 91(1): 51-68.

[37] Bodini A. Building a systemic environmental monitoring and indicators for sustainability: What has the ecological network approach to offer? Ecological Indicators, 2012, 15(1): 140-148.

[38] Niquil N, Chaumillon E, Johnson G A, Bertin X, Grami B, David V, Bacher C, Asmus H, Baird D, Asmus R. The effect of physical drivers on ecosystem indices derived from ecological network analysis: Comparison across estuarine ecosystems. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 108: 132-143.

[39] Ulanowicz R E. Quantitative methods for ecological network analysis. Computational Biology and Chemistry, 2004, 28(5/6): 321-339.

[40] Li Y, Yang Z F. Network structure analysis for environmental flow toward sustainable water use. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1737-1744.

[41] Fiscus D A. Comparative network analysis toward characterization of systemic organization for human-environmental sustainability. Ecological Modelling, 2009, 220(22): 3123-3132.

[42] Bodini A, Bondavalli C, Allesina S. Cities as ecosystems: Growth, development and implications for sustainability. Ecological Modelling, 2012, 245: 185-198.

[43] Ravalde T, Keirstead J. Comparing performance metrics for multi-resource systems: The case of urban metabolism. Journal of Cleaner Production, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.118.

[44] Kharrazi A, Masaru Y. Quantifying the sustainability of integrated urban waste and energy networks: Seeking an optimal balance between network efficiency and resilience. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1663-1667.

[45] Lu Y, Chen B. Carbon metabolism in urban communities. Energy Procedia, 2015, 75: 2969-2973.

[46] Suh S. Theory of materials and energy flow analysis in ecology and economics. Ecological Modelling, 2005, 189(3/4): 251-269.

[47] Ghosh A. Input-output approach in an allocation system. Economica, 1958, 25(97): 58-64.

[48] Defourny J, Thorbecke E. Structural path analysis and multiplier decomposition within a social accounting matrix framework. The Economic Journal, 1984, 94(373): 111-136.

[49] Zhang Y, Zheng H M, Fath B D. Analysis of the energy metabolism of urban socioeconomic sectors and the associated carbon footprints: Model development and a case study for Beijing. Energy Policy, 2014, 73: 540-551.

[50] Small G E, Sterner R W, Finlay J C. An ecological network analysis of nitrogen cycling in the Laurentian Great Lakes. Ecological Modelling, 2014, 293: 150-160.

[51] Scharler U M, Fath B D. Comparing network analysis methodologies for consumer-resource relations at species and ecosystems scales. Ecological Modelling, 2009, 220(22): 3210-3218.

[52] Zhang Y, Zheng H M, Fath B D. Ecological network analysis of an industrial symbiosis system: A case study of the Shandong Lubei eco-industrial park. Ecological Modelling, 2015, 306: 174-184.

[53] Chen S Q, Chen B. Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: A case study of Vienna, Austria. Environmental Science & Technology, 2012, 46(8): 4498-4506.

[54] Fath B D. Distributed control in ecological networks. Ecological Modelling, 2004, 179(2): 235-245.

[55] Zhang Y, Liu H, Fath B D. Synergism analysis of an urban metabolic system: Model development and a case study for Beijing, China. Ecological Modelling, 2014, 272: 188-197.

[56] Fath B D, Patten B C. Network synergism: Emergence of positive relations in ecological systems. Ecological Modelling, 1998, 107(2/3): 127-143.

[57] Yang Z F, Mao X F, Zhao X, Chen B. Ecological network analysis on global virtual water trade. Environmental Science & Technology, 2012, 46(3): 1796-1803.

[58] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Li J J, Yin X A, Liu G Y, Su M R. Analysis of urban energy consumption in carbon metabolic processes and its structural attributes: A case study for Beijing. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 884-897.

[59] Zhang Y, Yang Z F, Fath B D. Ecological network analysis of an urban water metabolic system: Model development, and a case study for Beijing. Science of the Total Environment, 2010, 408(20): 4702-4711.

[60] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Liu G Y, Su M R. Analysis of the industrial metabolic processes for sulfur in the Lubei (Shandong Province, China) eco-industrial park. Journal of Cleaner Production, 2015, 96: 126-138.

[61] Min Y, Jin X G, Chang J, Peng C H, Gu B J, Ge Y, Zhong Y. Weak indirect effects inherent to nitrogen biogeochemical cycling within anthropogenic ecosystems: A network environ analysis. Ecological Modelling, 2011, 222(17): 3277-3284.

[62] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Su M R, Liu G Y, Li Y X. Multi-regional input-output model and ecological network analysis for regional

embodied energy accounting in China. Energy Policy, 2015, 86: 651-663.

[63] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Li Y X, Liu G Y, Su M R, Yin X A. Urban energy flow processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration: Combining multi-regional input-output tables with ecological network analysis. Journal of Cleaner Production, 2015, 114: 243-256.

[64] Lu Y, Su M R, Liu G Y, Chen B, Zhou S Y, Jiang M M. Ecological network analysis for a low-carbon and high-tech industrial park. The Scientific World Journal, 2012,2012: 305474.

[65] Lu Y, Chen B, Feng K S, Hubacek K. Ecological network analysis for carbon metabolism of eco-industrial parks: A case study of a typical eco-industrial park in Beijing. Environmental Science & Technology, 2015, 49(12): 7254-7264.

[66] Zhang Y, Zhang J Y, Yang Z F. Network relationship analysis of urban energy metabolic system. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1407-1412.

[67] Zhang Y, Li S S, Fath B D, Yang Z F, Yang N J. Analysis of an urban energy metabolic system: Comparison of simple and complex model results. Ecological Modelling, 2011, 223(1): 14-19.

[68] Li S S, Zhang Y, Yang Z F, Liu H, Zhang J Y. Ecological relationship analysis of the urban metabolic system of Beijing, China. Environmental Pollution, 2012, 170: 169-176.

[69] Liu G Y, Yang Z F, Chen B, Zhang Y. Ecological network determination of sectoral linkages, utility relations and structural characteristics on urban ecological economic system. Ecological Modelling, 2011, 222(15): 2825-2834.

[70] Zhang Y, Xia L L, Fath B D, Yang Z F, Yin X A, Su M R, Liu G R, Li Y X. Development of a spatially explicit network model of urban metabolism and analysis of the distribution of ecological relationships: case study of Beijing, China. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 4304-4317.

[71] Yang Z F, Zhang Y, Li S S, Liu H, Zheng H M, Zhang J Y, Su M R, Liu G Y. Characterizing urban metabolic systems with an ecological hierarchy method, Beijing, China. Landscape and Urban Planning, 2014, 121: 19-33.

[72] Mao X F, Yang Z F. Ecological network analysis for virtual water trade system: A case study for the Baiyangdian Basin in Northern China. Ecological Informatics, 2012, 10: 17-24.

[73] Li Y T, Zhang Y, Yang N J. Ecological network model analysis of China′s endosomatic and exosomciatic societal metabolism. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1400-1406.

[74] Wu B, Zeng W H, Chen H H, Zhao Y. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 3138-3151.

[75] Zheng H M, Fath B D, Zhang Y. An urban metabolism and carbon footprint analysis of the Jing-Jin-Ji regional agglomeration. Journal of Industrial Ecology, 2016, doi: 10.1111/jiec.12432.

[76] Borrett S R. Throughflow centrality is a global indicator of the functional importance of species in ecosystems. Ecological Indicators, 2013, 32: 182-196.

[77] Wolman A. The metabolism of cities. Scientific American, 1965, 213(3): 179-190.

[78] Chen B, Chen S Q. Eco-indicators for urban metabolism. Ecological Indicators, 2014, 47: 5-6.

[79] Zhang Y, Xia L L, Xiang W N. Analyzing spatial patterns of urban carbon metabolism: A case study in Beijing, China. Landscape and Urban Planning, 2014, 130: 184-200.

[80] 陈定江. 工业生态系统分析集成与复杂性研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.

[81] Liu G Y, Yang Z F, Su M R, Chen B. The structure, evolution and sustainability of urban socio-economic system. Ecological Informatics, 2012, 10: 2-9.

[82] Liu H, Zhang Y. Ecological network analysis of urban metabolism based on input-output table. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1616-1623.

[83] 韩博平. 生态网络与生态网络分析. 自然杂志, 1993, (S1): 46-49.

[84] 韩博平. 生态网络中物质流动的再循环指数及其灵敏度分析. 系统工程理论方法应用, 1993, 2(4): 71-77.

[85] 韩博平. 生态系统中流动路径多样性的测度. 生物多样性, 1996, 4(2): 114-118.

[86] 韩博平, 吴刚. 农林生态系统中营养元素 N、P、K 流动的网络分析. 应用生态学报, 1996, 7(1): 19-22.

[87] 韩博平. 生态网络中物质、能量流动的信息指标及其灵敏度分析. 系统工程理论方法应用, 1995, 4(1): 24-29.

[88] 韩博平, 林鹏. 生态网络中信息分析的方法与应用. 厦门大学学报: 自然科学版, 1996, 35(4): 648-651.

[89] 张妍, 杨志峰. 一种分析城市代谢系统互动关系的方法. 环境科学学报, 2009, 29(1): 217-224.

[90] 石红, 张博, 李媛, 海热提. 基于生态网络分析的流域水资源可持续性评价方法研究. 水电能源科学, 2015, 33(4): 38-42.

[91] 张博. 基于生态网络分析的流域水资源可持续性评价[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.

[92] 卢小丽, 秦晓楠. 沿海城市生态安全系统结构及稳定性研究. 系统工程理论与实践, 2015, 35(9): 2433-2441.